

**Д. А. Романов<sup>1\*</sup>, С. В. Московский<sup>1</sup>, В. Е. Громов<sup>1</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2</sup>,  
А. Д. Филяков<sup>1</sup>, Е. А. Гаевой**

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

\*romanov\_da@physics.sibsiu.ru

## **ПЭМ-СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ПОКРЫТИЯ $\text{SnO}_2\text{-Ag}$ , СФОРМИРОВАННОГО НА МЕДНЫХ КОНТАКТАХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Методом просвечивающей электронной микроскопии выполнены исследования фазового и элементного состава поверхностного слоя медного электрического контакта контактора КПВ-604, подвергнутого электровзрывному напылению композиционного покрытия системы  $\text{SnO}_2\text{-Ag}$ . Масштаб элементов структуры поверхности покрытия после электровзрывного напыления изменяется в очень широком интервале — от сотен микрометров до десятков — сотен нанометров. По морфологическому признаку в объеме покрытия можно выделить два слоя: собственно покрытие и слой термического влияния, плавно переходящий в основной объем образца. Выявлено образование многоэлементного многофазного покрытия, имеющего нанокристаллическую структуру.

*Ключевые слова:* электровзрывное напыление, электрические контакты, покрытие, серебро, диоксид олова, просвечивающая электронная микроскопия.

**D. A. Romanov, S. V. Moskovskii, V. E. Gromov,  
Yu. F. Ivanov, A. D. Filyakov, E. A. Gaevoi**

## **TEM-STRUCTURE OF ELECTROENBRAVING COATING $\text{SnO}_2\text{-Ag}$ , FORMED ON COPPER CONTACTS OF SWITCHES OF POWERFUL ELECTRICAL LINES**

The studies of the phase and elemental composition of the surface layer copper electric contact of KPV-604 contactor subjected to electroexplosion spraying of the composite  $\text{SnO}_2\text{-Ag}$ -system coating were done by the method of transmission electron microscopy. The scale of the elemental structure of the coating's surface varies within a very wide interval after the electroexplosion spraying — from hundreds of micrometers to tens of hundreds of nanometers. According to the morphological feature two layers may be distinguished in the

coating's volume: the coating proper and the thermal effect layer smoothly transferring to the bulk of the sample. The nanocrystalline structure was detected.

*Key words:* electroexplosion spraying, electrical contacts, coating, silver, tin dioxide, transmission electron microscopy.

По данным Международной ассоциации «Интерэлектромаш», доля отказов в работе электрооборудования по причине выхода из строя контактного аппарата занимает первое место среди прочих неисправностей и составляет 26 %. Для восстановления работы контакт заменяют на новый. Для материалов электрических контактов характерно сочетание разнообразных и одновременно несовместимых требований. Для них, например, необходимы высокие твердость, температура плавления, электро- и теплопроводность, электроэрозионная и коррозионная стойкость, сочетающиеся с отсутствием сваривания и мостикообразования. Реализовать в одном материале многообразный и противоречивый комплекс свойств, которыми должен обладать электроконтактный материал, позволяет использование методов порошковой металлургии. В настоящее время разработано большое количество электроконтактных материалов для их применения в разнообразных условиях эксплуатации. В их состав входит, как правило, матрица, обладающая высокой электропроводностью, и тугоплавкий компонент (наполнитель) с высокой износо- и электроэрозионной стойкостью. Наиболее перспективными для изготовления контактов являются композиционные материалы на основе серебряной, медной, медно-никелевой, алюминиевой матрицы и тугоплавкого наполнителя. К ним относят следующие системы: W–Cu, Mo–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu, Ti–B–Cu, TiB<sub>2</sub>–Cu, TiB<sub>2</sub>–Al, W–Ni–Cu, Mo–Ni–Cu, Cr–C–Cu, Cr–Cu, CdO–Ag, SnO<sub>2</sub>–Ag, W–Ag, Mo–Ag, W–C–Ag и Mo–C–Ag и др.

По экспертным оценкам, объем мирового рынка композиционных материалов за 2016 г. составил около 17 млн т. В структуре мирового потребления композиционных материалов и изделий из них по секторам экономики доля композиционных материалов, потребляемых в электронной и энергетической отраслях, составляет 21 % среди прочих отраслей промышленности и является основным «драйвером роста». Объем внутреннего производства дугостойких электрических контактов из композиционных материалов составляет 18 млрд р. Если учесть то, что фактически износ контакта до выхода его из строя и замены на новый не превышает 50 %, то около 9 млрд р. расходуется впустую только в Российской Федерации.

Поскольку процесс разрушения материала начинается с его поверхности, для практического применения, например упрочнения контактных поверхностей средне- и тяжело нагруженных выключателей и коммутационных аппаратов, перспективно формирование защитных покрытий, т. к. в этом случае важна электроэрозионная стойкость только поверхности контакта, а не всего объема. Экономически и технически целесообразно развивать подход к созданию материалов, при котором механическая прочность детали обеспечивается применением экономичных подложек, а специальные свойства поверхности — сплошным или локальным формированием на ней композиционных покрытий, свойства которых соответствуют эксплуатационным требованиям. Экономия при таком подходе может достигать 90 %. Экспертные оценки подтверждают эту тенденцию. Одним из приоритетных направлений физики конденсированного состояния является разработка методов повышения эксплуатационных характеристик различных материалов. С учетом этого упрочнение поверхности дугостойких электрических контактов является актуальной задачей развития новых современных технологий.

Цель работы — исследование фазового состава, дефектной субструктуры и морфологии фаз электровзрывного покрытия системы  $\text{SnO}_2\text{—Ag}$  посредством просвечивающей электронной микроскопии.

Объектом исследований являлись медные контакты контактора КПВ-605, на контактных поверхностях которых электровзрывным методом было сформировано покрытие системы  $\text{SnO}_2\text{—Ag}$ . В качестве взрываемого токопроводящего материала была использована фольга серебра массой 250 мг, на поверхность которой в область взрыва помещалась навеска порошка  $\text{SnO}_2$  массой 50 мг. Время воздействия плазмы на поверхность образца около 100 мкс, поглощаемая плотность мощности на оси струи 5,5 ГВт/м<sup>2</sup>, давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности порядка 12,5 МПа, остаточное давление газа в рабочей камере 100 Па; температура плазмы на срезе сопла примерно 10<sup>4</sup> К, толщина зоны термического влияния приближена к 50 мкм. Элементный и фазовый состав, морфологию и дефектную субструктуру покрытия анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100F, JEOL). Фольги для исследования материала методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии изготавливали методом ионного утонения тонких (100 мкм) пластинок, расположенных в поперечном сечении образца. Это позволяло исследовать структуру покрытия и переходного слоя, разделяющего покрытие и подложку.

Слой меди, прилегающий к покрытию, имеет фрагментированную структуру, что может свидетельствовать о высоком уровне деформации поверхности образца при формировании покрытия.

Электронно-микроскопические изображения покрытия, формирующегося при электровзрывном модифицировании медного контакта контактора КПВ-605, свидетельствуют о том, что формирующиеся покрытия имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов, изменяющихся в пределах 20–40 нм.

Фазовый состав и дефектную субструктуру покрытия анализировали методами дифракционной электронной микроскопии. Известно, что в системе Ag–Sn–Cu могут быть сформированы соединения на основе Ag–Sn и Sn–Cu; также возможно присутствие твердых растворов на основе серебра, олова и меди. Не следует исключать присутствие в покрытии и окисных фаз указанных элементов.

Микроэлектронограмма имеет кольцевое строение, что однозначно свидетельствует о принадлежности покрытия к классу нанокристаллических материалов. Учитывая неравновесные условия превращений, имеющих место при электровзрывном формировании покрытия, и возможное присутствие одновременно нескольких фаз на исследуемом участке фольги, индигирование микроэлектронограмм осуществляли путем определения фазовой принадлежности по отдельности каждого из пяти ближайших дифракционных колец.

Индигирование микроэлектронограммы выявило рефлексы следующих фаз:  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Ag}_4\text{Sn}$  и  $\text{CuO}$ . Анализируя результаты исследований фазового состава покрытия, можно отметить, что частицы оксида олова  $\text{SnO}_2$  имеют округлую форму; размер частиц изменяются в пределах 15–40 нм. Частицы соединений  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Ag}_4\text{Sn}$  и  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  являются сравнительно более крупными (20–50 нм) и часто формируют области размерами 80–120 нм.

Таким образом, методами электронной дифракционной микроскопии проведены исследования элементного и фазового состава, дефектной субструктуры и морфологии фаз покрытия, сформированного на поверхности медных контактов переключателей мощных электрических сетей. Выявлено образование многоэлементного многофазного покрытия, имеющего нанокристаллическую структуру. Путем индигирования микроэлектронограмм установлено, что основными фазами покрытия являются  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Ag}_4\text{Sn}$  и  $\text{CuO}$ . Обнаружено, что объем меди, прилегающий к покрытию, имеет фрагментированную структуру, что может свидетельствовать о высоком уровне деформации поверхностного слоя образца при электровзрывном способе формировании покрытия.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол\_а\_дк и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-1118.2017.2, а также при частичной финансовой поддержке комплексной программы СО РАН в рамках программы фундаментальных исследований РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий» (проект № 0366-2015-0005).*